XXIV-я Международная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»

ОСНОВЫ ТЕОРИИ, РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРУЮЩИХ СФЕР ДЛЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ШИРОКОАПЕРТУРНОЙ АППАРАТУРЫ ДЗЗ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 0,38 – 2,50 МКМ

АО «РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ», Г. МОСКВА

КОРНЕЕВ МИХАИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ	инженер-исследователь
ЗОРИН СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ	начальник сектора, к.т.н.
ТРОФИМОВ ДМИТРИЙ ОЛЕГОВИЧ	главный специалист, к.т.н.
НОВИКОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ	инженер-исследователь
ВОРОТЫНЦЕВА ЕВГЕНИЯ НИКОЛАЕВНА	инженер-исследователь

11 ноября 2026 г.
НЦ ОМЗ, г. Москва

ИНТЕГРИРУЮЩАЯ СФЕРА

Интегрирующая сфера — протяженный источник оптического излучения. В результате калибровки определяют энергетические и спектральные характеристики его излучения (Спектральная плотность энергетической яркости - СПЭЯ).

Принцип работы интегрирующей сферы заключается в пространственном интегрировании энергетического потока специально подобранных точечных излучателей.

Оптико-электронная аппаратура (ОЭА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) должна обладать измерительными функциями с привязкой получаемых радиометрических данных в заданной области спектра по энергетической яркости или радиационной температуре к государственным эталонам.





Рисунок 1 – Внешний вид интегрирующих сфер

ДАННЫЕ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ПО ЭФФЕКТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ. ИХ ПОТРЕБИТЕЛИ

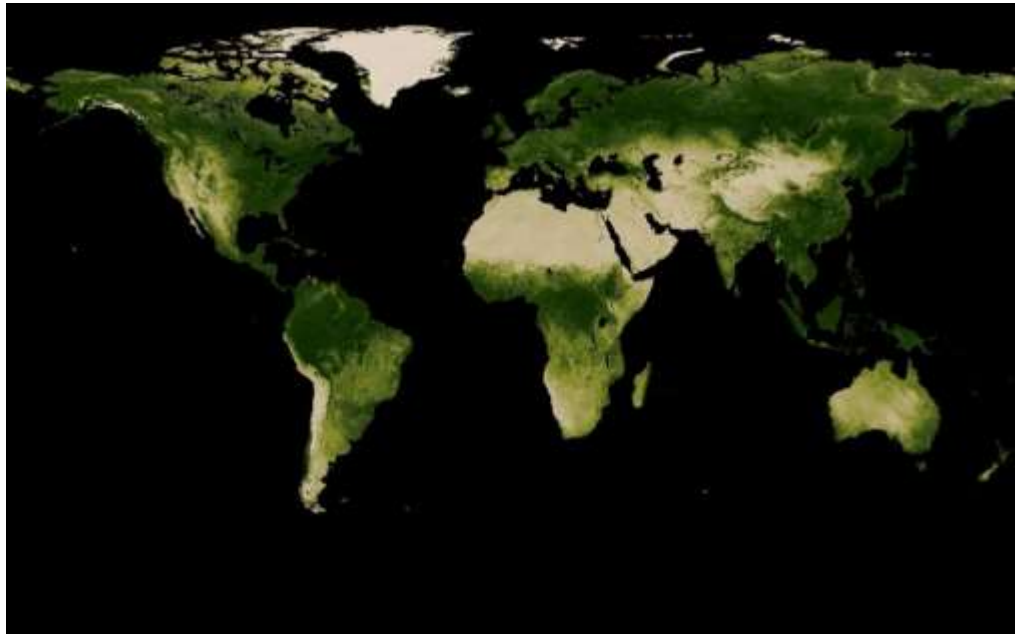
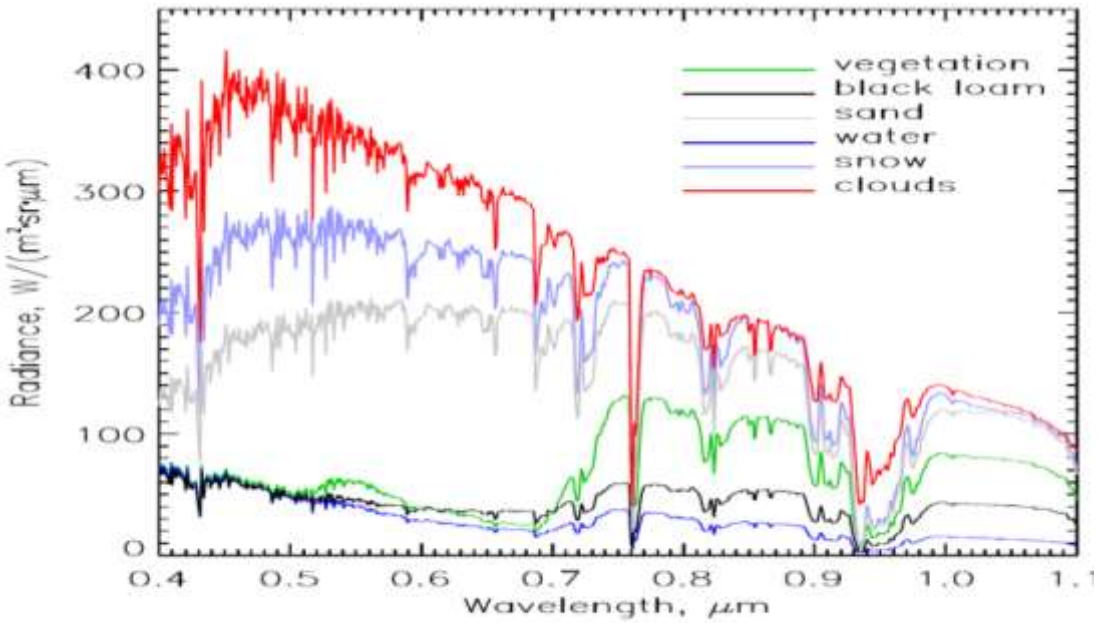


Рисунок 2 – Пример глобальной карты нормализованного вегетационного индекса

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

RED – красный канал (0,55–0,75 мкм).
NIR – БИК канал (0,75–1,0 мкм).



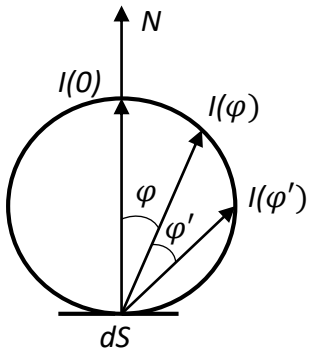
Яркость земных объектов W/m2*sr*mkm

- информация о количестве планктона в морских водах;
- данные о болезнях и урожайности сельскохозяйственных культур;
- оценка состояния лесного хозяйства;
- состояние атмосферы;
- прогноз полетов авиации.

ОСОБЕННОСТЬ ИНДИКАТРИСЫ ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СФЕРЫ

Солнечная модель съемки – модель настройки аппаратуры на максимум сигнала, соответствующего засветке входного зрачка ОЭА отраженным излучением солнца от плотных облаков (альбедо 0,8 – 0,9)

Закон Ламберта



$$dI(\varphi) = L \cdot dS \cdot \cos\varphi; \quad (1)$$

$$dM_e = L \cdot \cos\varphi \cdot d\omega. \quad (2)$$

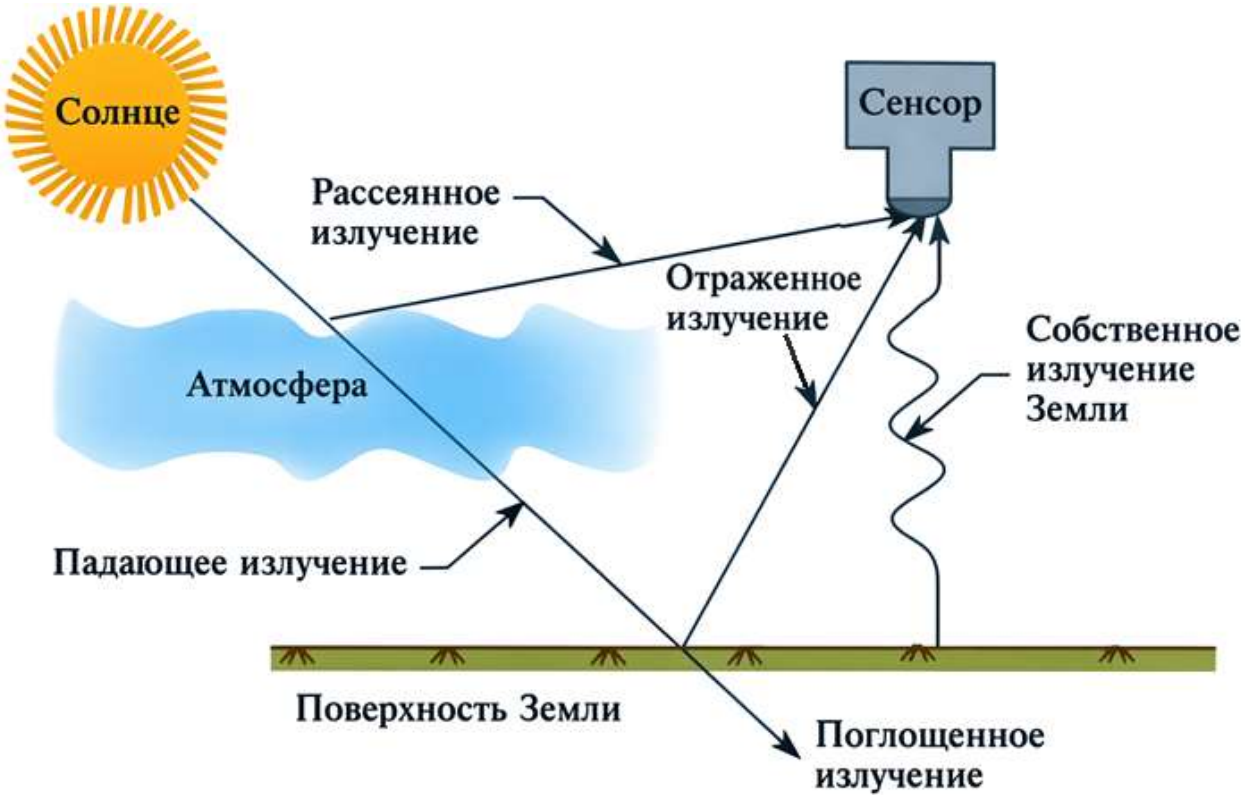


Рисунок 3 – Схема приема солнечного излучения оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) ДЗЗ на верхней границе атмосферы (ВГА)

ОПТИМИЗАЦИЯ СООТНОШЕНИЯ ДИАМЕТРА ВЫХОДНОГО ЗРАЧКА СФЕРЫ С ВХОДНЫМ ЗРАЧКОМ КАЛИБРУЕМОЙ ОЭА

На рисунке 4 изображена схема проецирования диффузного излучения сферы на калибруемый прибор [1].

Осевая освещенность в центре входной апертуры прибора E_0 определяется по формуле:

$$E_0 = \pi L_s sin^2\theta, (3)$$

Осевая освещенность на краю входной апертуры прибора E_e определяется по формуле:

$$E_e = E_0 cos^4(\phi), (4)$$

Тогда равномерность излучения рассчитывается как отношение освещенности по формуле:

$$\frac{E_e}{E_0} = \frac{cos^4(\phi)}{\pi L_s sin^2\theta}, (5)$$

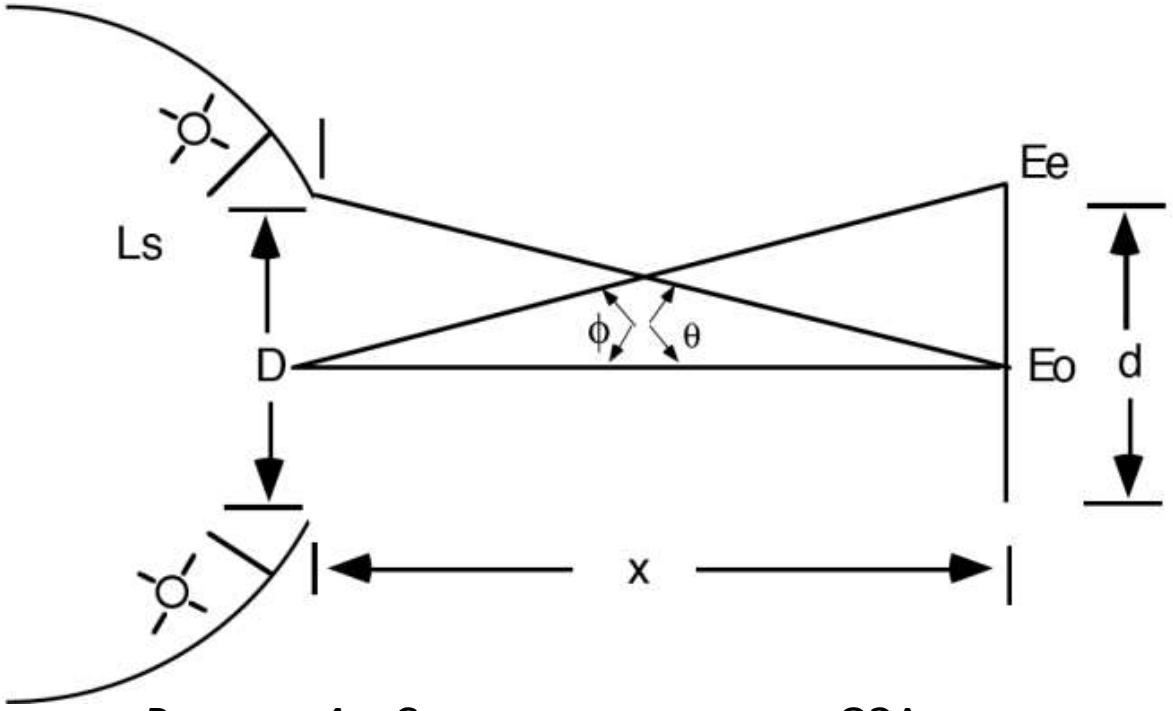


Рисунок 4 – Схема расположения ОЭА напротив интегрирующей сферы [1]

- D – размер выходного окна излучателя;
- d – размер входного окна ОЭА;
- L_s – энергетическая яркость интегрирующей сферы;
- x – расстояние между источником и прибором;
- ϕ, θ – внеосевые углы излучения и приема.

УРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ

$$L = \frac{\Phi_i \rho}{\pi A_s} \cdot \frac{\rho}{1-\rho(1-f)}, \qquad (6)$$

$$\Phi_i = N \cdot \frac{\Phi_0}{\sigma T^4} \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\left(\exp\left({}^{c_2}/_{\lambda T}\right)-1\right)}, \quad (7)$$

где Φ_i – поток оптического излучения от внутренних источников; ρ – коэффициент отражения внутренней поверхности; f – доля площади отверстий; A_s – площадь сферы; N – количество ламп; Φ_0 – номинальная мощность лампы; λ – длина волны; T – температура нити накала; σ, c_1, c_2 – константы [2]

Для сферы, имеющей только одно выходное отверстие:

$$f = \frac{A_e}{A_s}, (8)$$

где A_e – площадь выходного отверстия сферы.

$$\mathrm{M} = \frac{\rho}{1-\rho(1-f)}, (9)$$

безразмерный коэффициент – сферический множитель [2]

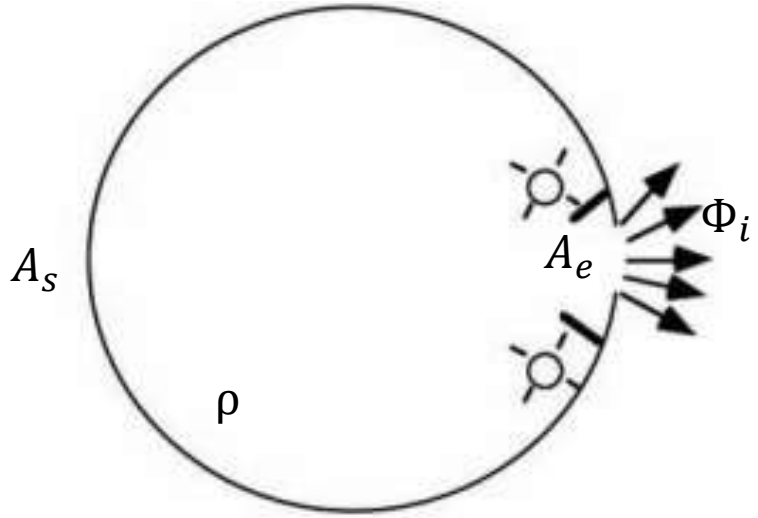


Рисунок 5 – Сфера с площадью A_s и площадью выходного отверстия A_e [2]

$$L^n{}_{эф} = \int_0^\infty L(\lambda) S_n(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

Эффективная энергетическая яркость объекта (международное название - *inBand Radiance*), измеряемая в канале *n ОЭА*;

L(λ) – спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ, *Spectral Radiance*) объекта;

$S_n(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность канала *n* аппаратуры

ОПТИМИЗАЦИЯ СООТНОШЕНИЯ ДИАМЕТРА ВЫХОДНОГО ЗРАЧКА СФЕРЫ С ВХОДНЫМ ЗРАЧКОМ КАЛИБРУЕМОЙ ОЭА

Однородность освещенности (Ee/Eo)

Отношение расстояния между объектами к диаметру выходной апертуры сферы (x/D)

Отношение диаметров объектов d/D	0.00	0.10	0.20	0.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	5.00	10.00
0.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.2	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.3	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
0.4	1.00	0.99	0.96	0.94	0.92	0.93	0.95	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00
0.5	1.00	0.97	0.92	0.90	0.88	0.90	0.92	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00
0.6	1.00	0.95	0.88	0.85	0.82	0.86	0.89	0.94	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
0.7	1.00	0.92	0.81	0.78	0.76	0.81	0.86	0.92	0.95	0.96	0.97	0.99	1.00
0.8	1.00	0.84	0.72	0.69	0.70	0.76	0.82	0.89	0.93	0.95	0.97	0.99	1.00
0.9	1.00	0.70	0.60	0.59	0.62	0.71	0.78	0.87	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00
$\sin^2\theta$	1.000	0.962	0.862	0.800	0.500	0.308	0.200	0.100	0.059	0.038	0.027	0.010	0.002
$\pi\sin^2\theta$	3.142	3.021	3.708	2.513	1.571	0.967	0.628	0.314	0.185	0.121	0.085	0.031	0.008

Таблица 1 – Зависимость однородности освещенности E_e/E_0 от отношения диаметров объектов *d/D* и отношения расстояния между объектами к диаметру выходной апертуры сферы *x/D* [2]

Выделены границы интервалов, в которых значения равномерности соответствуют 98%, 95% и 90%

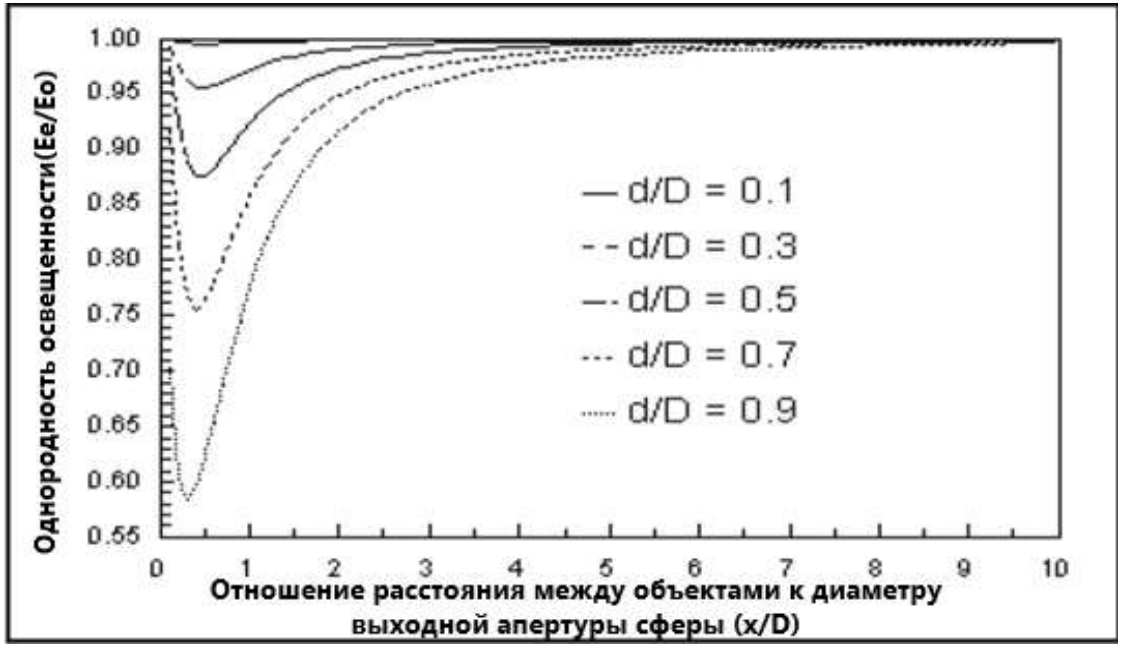
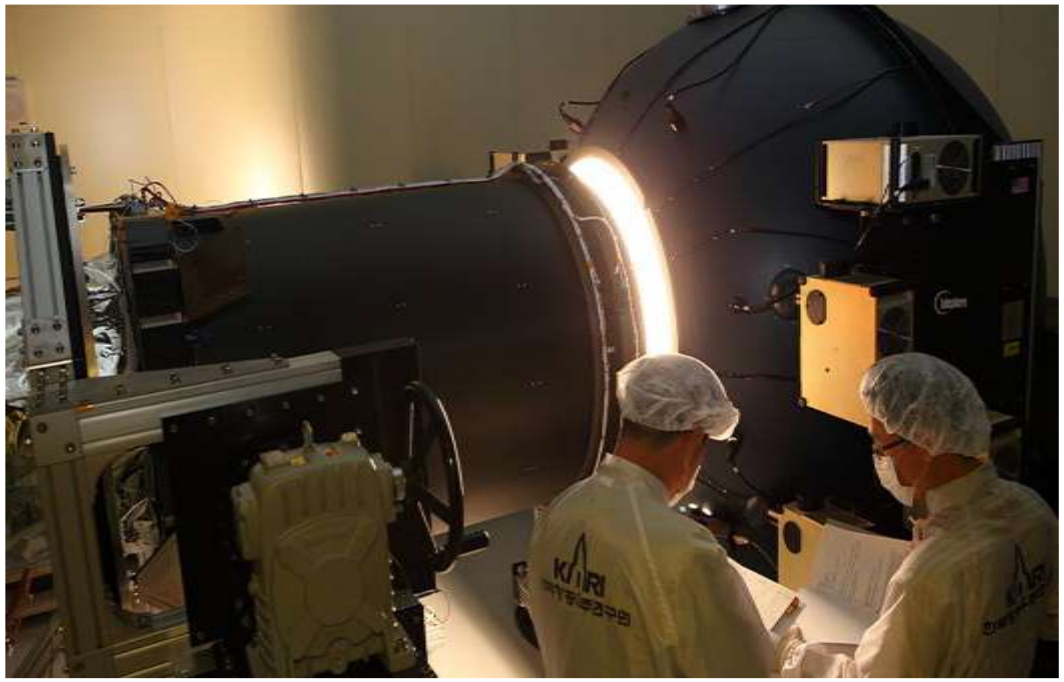


Рисунок 6 – График зависимости однородности освещенности от отношения расстояния между объектами к диаметру выходной апертуры сферы [2]

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СФЕРЫ ДЛЯ ОЭА С АПЕРТУРОЙ 0,5 М



Исходные данные:

d = 0,5 м – диаметр апертуры ОЭА;

Δ = 1% - неравномерность яркости выходного потока.

Расчет:

$\boldsymbol{D = 0,6}$ м ⇒ соотношение d/D = 0,5/0,6 = 0,83, тогда по Таблице 1 равномерность 0,99 достигается при $\boldsymbol{x = 0}$ и при $x/D = 5 \Rightarrow \boldsymbol{x = 3}$ м

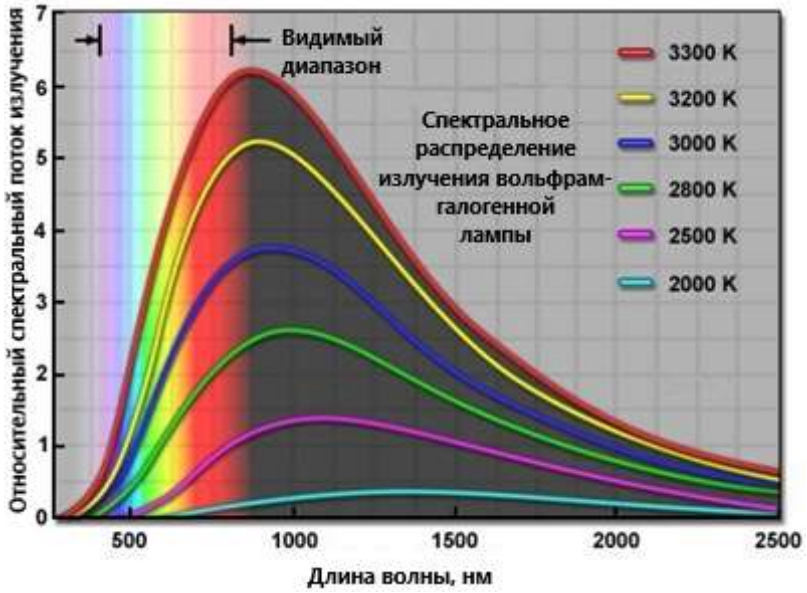
Внутренний диаметр сферы: $\frac{D}{D_{\text{сф}}} = \frac{1}{3}$ [3] $\Rightarrow \boldsymbol{D_{\text{сф}} = 1,8}$ м

Выводы:

1. Диаметр выходного зрачка ИС должен быть не менее диаметра входного зрачка калибруемой ОЭА.
2. При диаметре апертуры ОЭА d=0,5 м оптимальный диаметр выходного отверстия сферы равен 0,6 м, а внутренний диаметр сферы не менее 1,8 м.
3. Оптимальное расстояние между сферой и ОЭА при калибровке: установка либо непосредственно перед входным зрачком, либо x = 3 м.

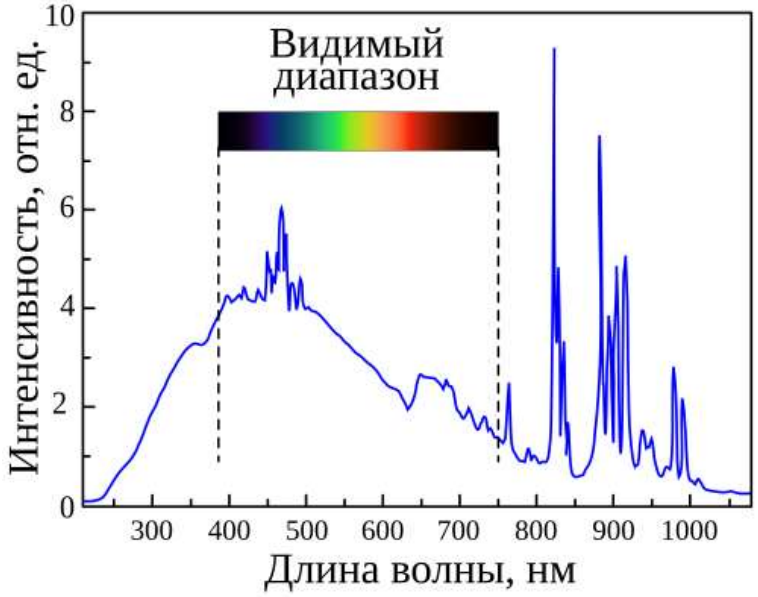
ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ МОДЕЛИ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРЫ

Кварцевые галогенные лампы



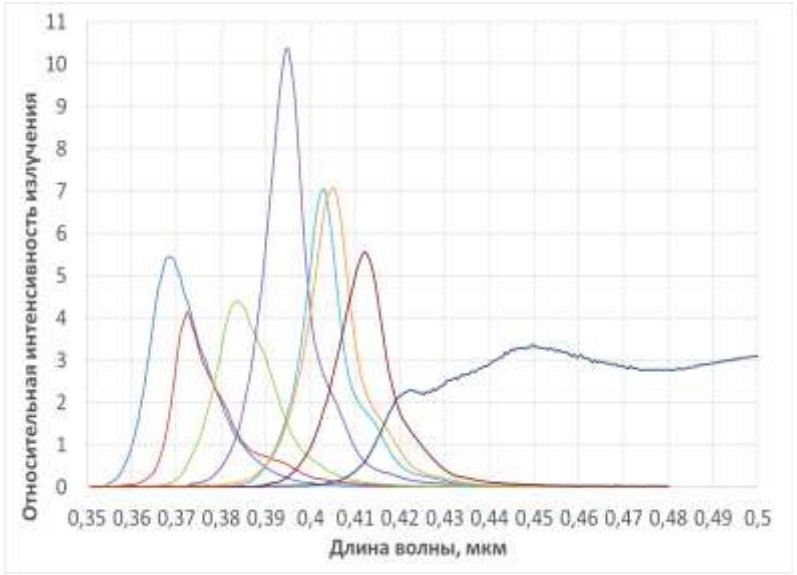
Плавная спектральная характеристика с пиком в БИК-области, однако наблюдается недостаточная интенсивность в синей области.

Ксеноновая дуговая лампа



Широкий непрерывный спектр с множеством острых пиков преимущественно в ближней ИК области.

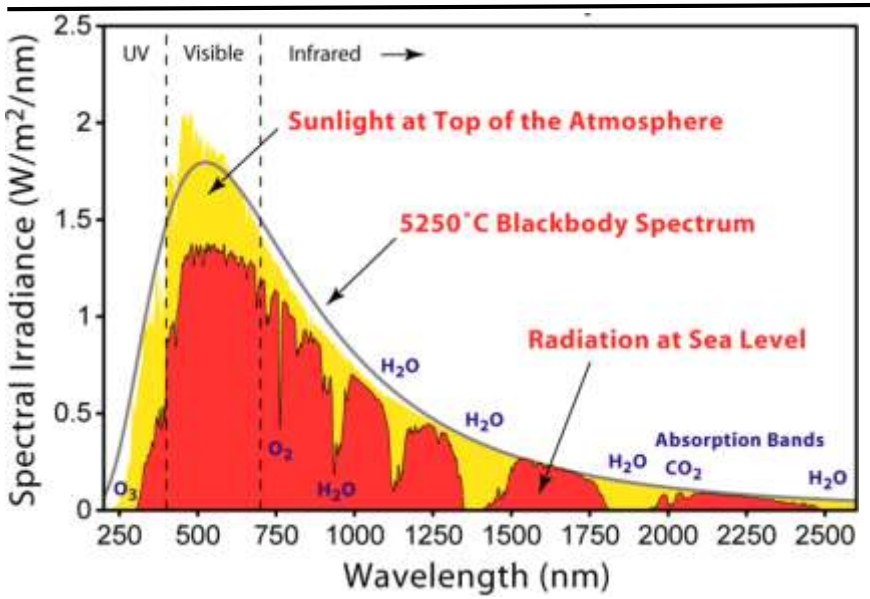
Относительные спектры излучения синих и белых светодиодов



Узкие спектральные зоны излучения, суммирование которых дает неравномерность спектральной характеристики

ОПТИМАЛЬНАЯ КОМБИНАЦИЯ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРА

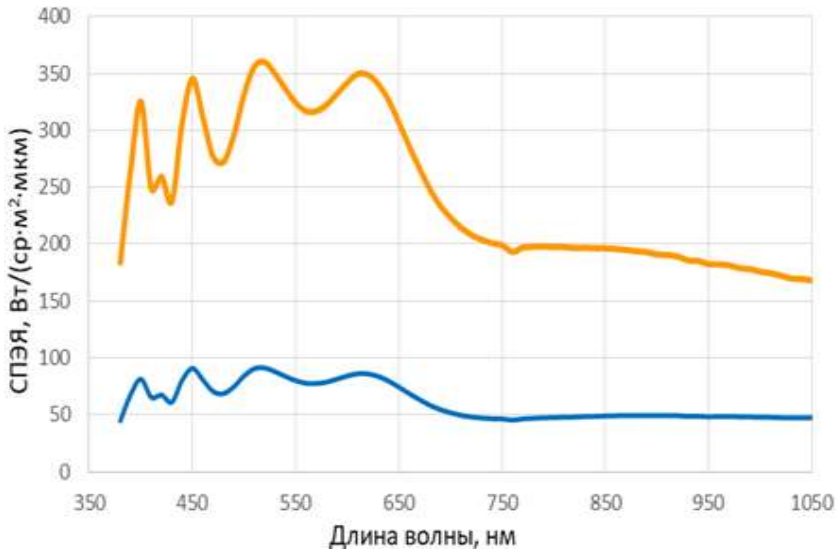
СПЭЯ излучения Солнца



<u>Распределение энергии по диапазонам:</u>

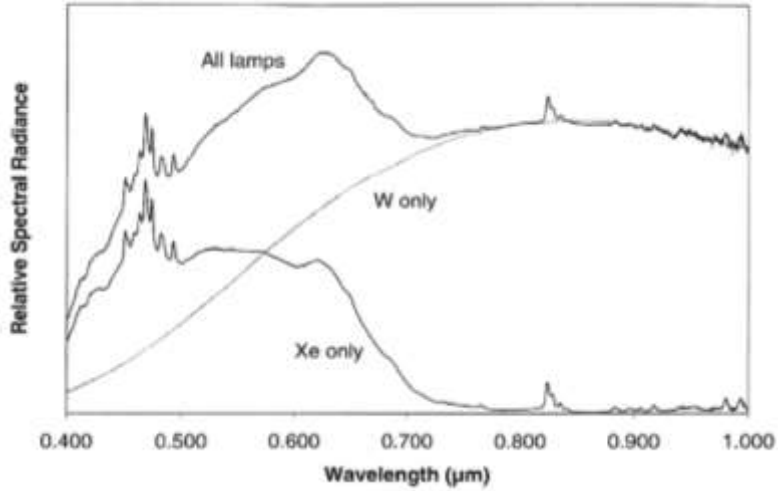
- Ультрафиолетовое излучение — 9%.
- Видимый свет — 46% всей энергии.
- Инфракрасное излучение — 41%.

Галогенные лампы + светодиоды



- Высокое значение СПЭЯ в синей области
- Задача: обеспечить монотонную спектральную характеристику чтобы получить результат интегрирования, приемлемый для точной калибровки узких спектральных каналов ОЭА ДЗЗ

Галогенные лампы + ксенон



- Высокое значение СПЭЯ в синей области
- Пики и неравномерность негативно сказываются на точности калибровки
- Сложность интеграции в сферу, ввиду необходимости в частом обслуживании ксеноновой лампы
- Требуется серьезное охлаждение

МАТЕРИАЛЫ ПОКРЫТИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Материал	Достоинства	Недостатки
Сульфат бария ($BaSO_4$)	•Коэффициент отражения в видимой области спектра - 97%	•Чувствительность к влаге и механическим повреждениям •Деградирует и желтеет со временем
Спектралон: на основе политетрафторэтилена **[C_2F_4] – (ПТФЭ - фторопласт-4**)	•Высокий коэффициент диффузного отражения - 99% •Высокая радиационная стойкость для систем бортовой калибровки	•Чувствительность к механическим повреждениям •Высокая стоимость •Технологические ограничения по размеру (диаметру) сферы
Золото (**Au**)	•Коэффициент отражения •>90% на длине волны 800 нм; •>94% на длине волны 1550 нм	•Не подходит для видимой части спектрального диапазона •Высокая стоимость •Не является диффузным отражателем
ЭКОМ-ЖС-2М ($BaAl_2O_4$) на основе жидкого стекла	•Высокая радиационная стойкость •Коэффициент диффузного отражения - 94% •Испытан в космосе (применение в системе бортовой калибровки)	•Недостаточно апробирован •Низкий коэффициент отражения •Необходима отработка нанесения на внутреннюю поверхность сферы

РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА ВОЛЬФРАМОВЫХ ГАЛОГЕННЫХ ЛАМП И СВЕТОДИОДОВ ДЛЯ УСТАНОВКИ ВНУТРИ СФЕРЫ

Таблица 2 - Исходные данные

$D_{сф}$	$1,8$ м
D	$0,6$ м
ρ	$0,97$
ε	$0,35$ ($\lambda = 980$ нм)
T	3000 К
$max\ L_{СПЭЯ}$	$5,3 \cdot 10^{8}$ $\frac{Вт}{м^3 \cdot ср}$
σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$ $\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$
c_1	$3,74 \cdot 10^{-16}$ (Вт $\cdot$ м^2)
c_2	$1,439 \cdot 10^{-16}$(м $\cdot$ К)

Таблица 3 - Основные характеристики лампы OSRAM HLX 62139-12V100W при Uном=12 В

Φ_0	**100** Вт
Ф	**2800** лм
$T_{цвет}$	**3300** К

Таблица 4 - Количество ламп в зависимости от требуемого значения СПЭЯ ($max\ L_{СПЭЯ}$) и коэффициента отражения (ρ)

$max\ L_{СПЭЯ}$, $^{Вт}/_{м^3 \cdot ср}$	ρ	N
$5,3 \cdot 10^8$	$BaSO_4 = 0,97$	15
$5,3 \cdot 10^8$	$C_2F_4 = 0,99$	10
$5,3 \cdot 10^8$	$BaAl_2O_4 = 0,94$	23
$3,5 \cdot 10^8$	$BaSO_4 = 0,97$	10
$3,5 \cdot 10^8$	$C_2F_4 = 0,99$	7
$3,5 \cdot 10^8$	$BaAl_2O_4 = 0,94$	15

Таблица 5 - Распределение моделей светодиодов по спектральным диапазонам

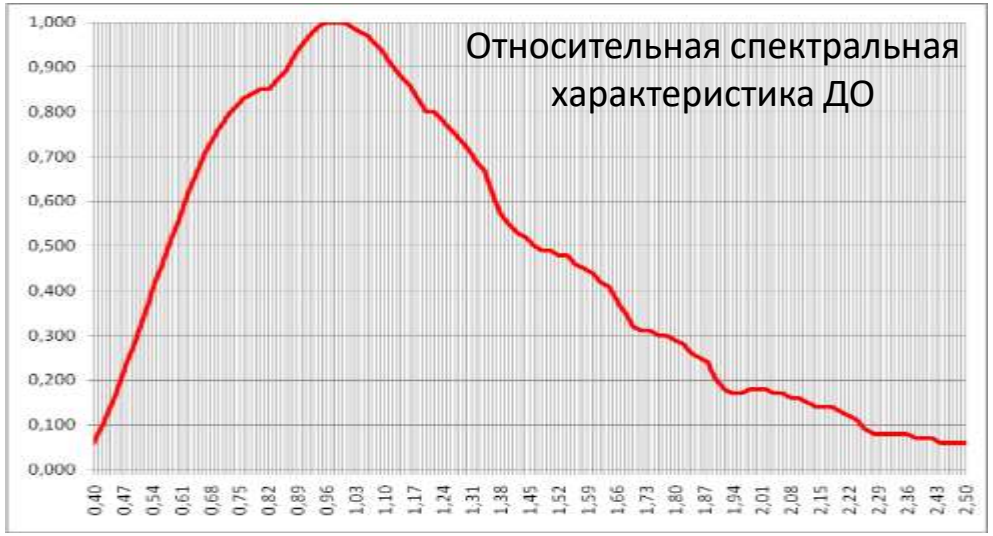
Центральная длина волны, нм	Модель	Количество
385	Ninchia NCSSU033C-T385	3
405	LUMINUS SST-08-UV	3
420	Nichia NVSU233C-V420	3
450	OSRAM OSLON SSL 150	3

СУЩЕСТВУЮЩИЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕГРИРУЮЩИХ СФЕР (РОССИЯ)

Комплекс «Камелия» (АО «Российские космические системы»)

Наименование характеристики	Значение
Спектральный диапазон измеряемых длин волн, мкм	от 0,4 до 2,5
Абсолютное значение СПЭЯ диффузного осветителя на длине волны 0,98 мкм, Вт/ср·м^3, не менее	3,8·10^8
Пределы допускаемой относительной погрешности абсолютного значения СПЭЯ диффузного осветителя (ДО) на длине волны 0,98 мкм, %	± 6,5
Пределы допускаемой относительной погрешности относительного распределения СПЭЯ диффузного осветителя в диапазоне длин волн от 0,4 до 2,5 мкм, %	± 6,5
Максимальный световой диаметр	230 мм
Источники	12 ВГЛ

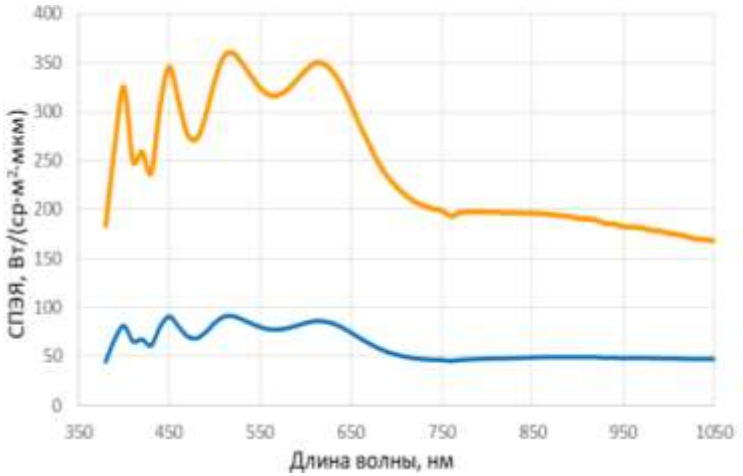




СУЩЕСТВУЮЩИЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕГРИРУЮЩИХ СФЕР (РОССИЯ)

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» [5]

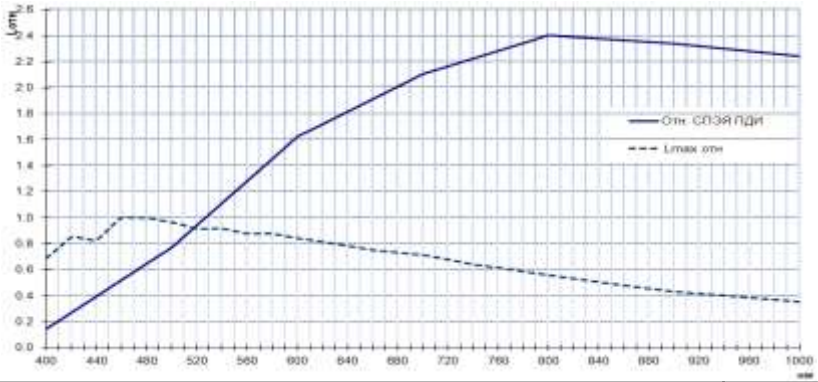




Наименование характеристики	Значение
Максимальный диаметр выходного окна, мм	1000
Диаметр внутренней поверхности, мм	2500
Рабочая область спектра, нм	380 - 2600
Диапазон измерений СПЭЯ в максимуме модельного распределения, Вт/(ср·м^3)	$3{,}5 \cdot 10^6 - 3{,}5 \cdot 10^8$
Неравномерность СПЭЯ по выходной апертуре (от среднего значения) не более, %	3
Угловая неравномерность СПЭЯ (центральной точки выходного зрачка от среднего значения) в диапазоне углов ±8° не более, %	3
Доверительная граница относительной погрешности (с вероятностью 0,95) воспроизведения СПЭЯ, %, не более для значений выше $2 \cdot 10^6$ Вт/(ср·м^3)	4

ФГБУ «ВНИИОФИ» (ГЭТ 179-2010) [4]



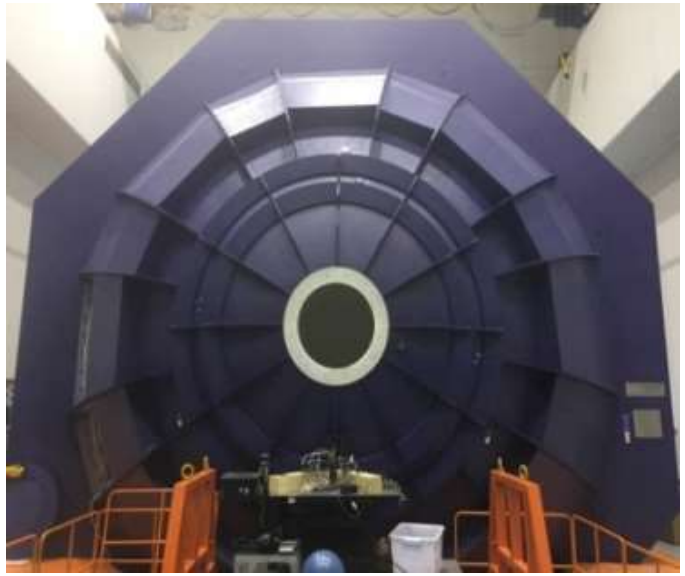


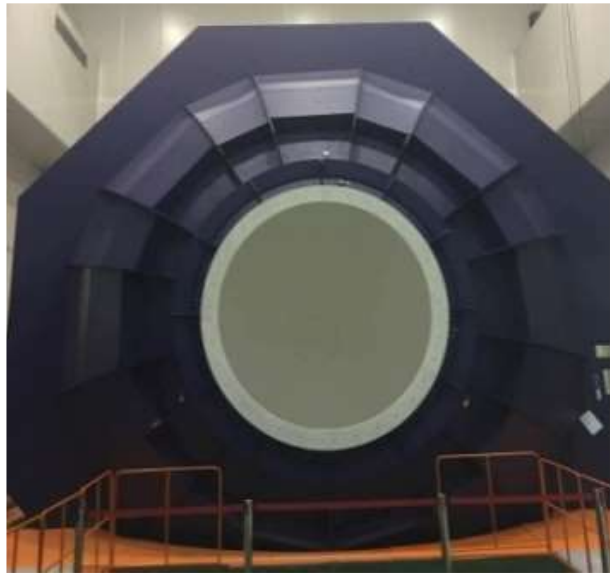
Наименование характеристики	Значение
Спектральный диапазон, мкм	0,3–2,5
Максимальный диаметр выходного окна, мм	600
Стандартная неопределенность воспроизведения СПЭЯ, %	0,5–1,5
Диаметр внутренней поверхности, мм	2000
Источники	24 ВГЛ

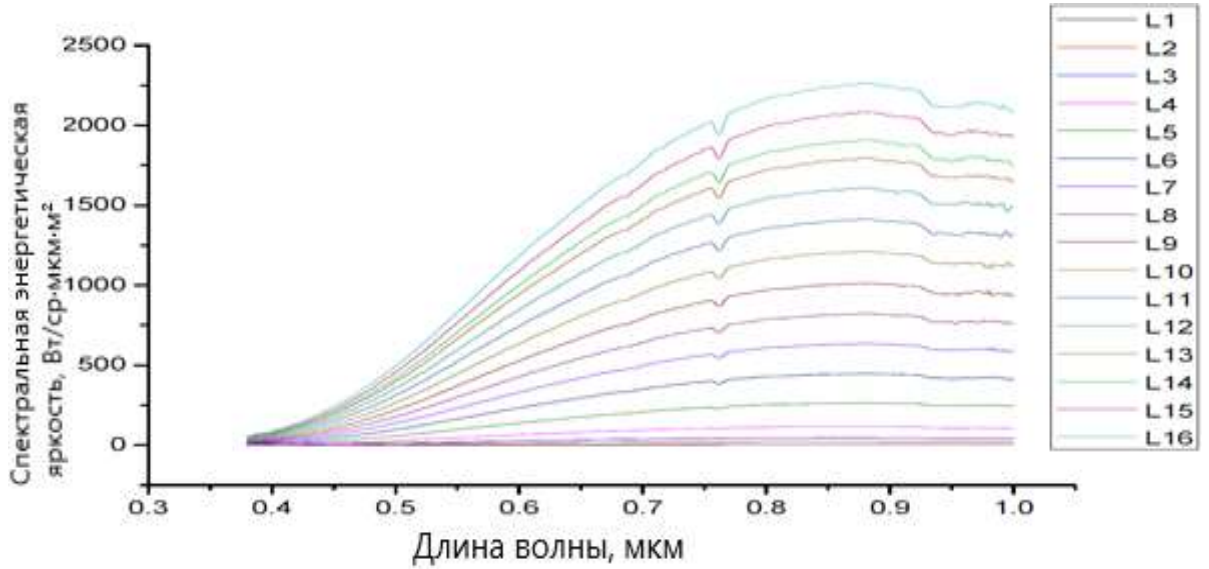
СУЩЕСТВУЮЩИЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕГРИРУЮЩИХ СФЕР (ЗАРУБЕЖНЫЕ) [5]

Китайская Академия наук

Наименование характеристики	Значение
Диаметр внутренней поверхности сферы, м	8,0
Диаметр выходной апертуры, м	0,8 / 2,5 / 3,2
Источники	ГВЛ
Спектральный диапазон, нм	380 - 1050
Цветовая температура, К	3000
Равномерность по диаметру выходного окна, %	>98 для ∅3,2 м
Угловая однородность, %	>88 для ±45°
Интегральная энергетическая яркость (0,45-0,90 мкм) для апертуры 0,8 м, Вт/(ср·м^2)	>600

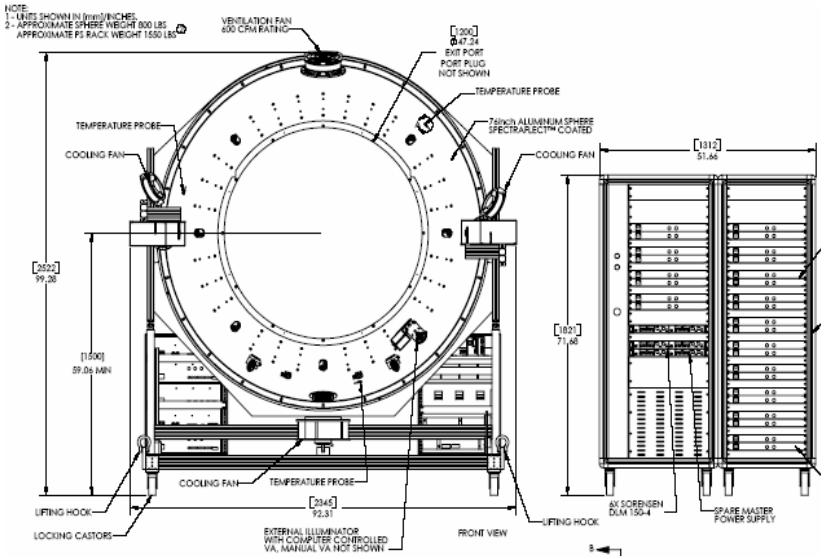


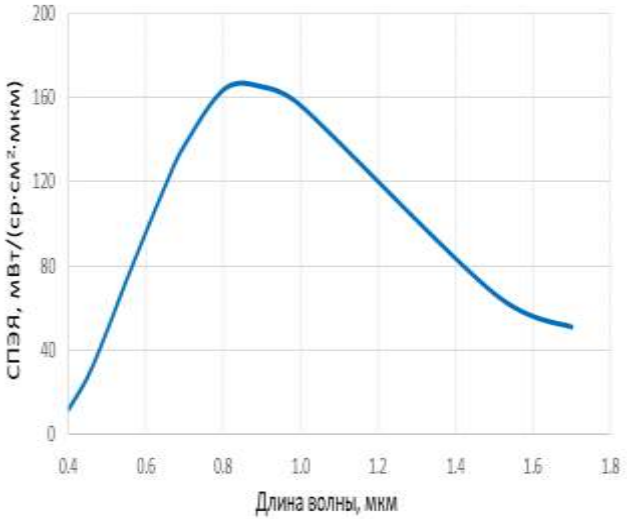




СУЩЕСТВУЮЩИЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕГРИРУЮЩИХ СФЕР (ЗАРУБЕЖНЫЕ) [5]

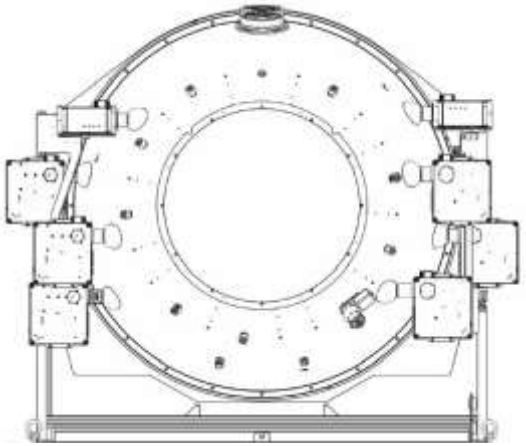
Индийская организации космических исследований

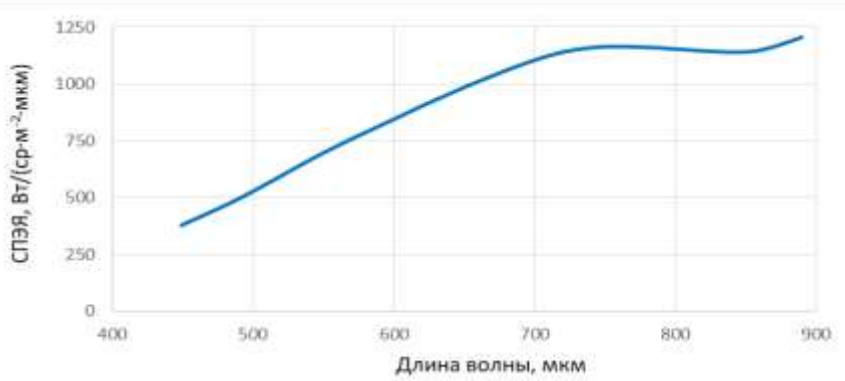




Наименование характеристики	Значение
Диаметр внутренней поверхности сферы, м	1,9
Диаметр выходной апертуры, м	1,2
Количество уровней яркости	30
Источники	32 ВГЛ
Спектральный диапазон, нм	400 - 1700
Цветовая температура, К	3000
Пространственная однородность, %	>95
Угловая однородность, %	>97 для ±10°; >94 для ±45°

Корейский институт аэрокосмических исследований





Наименование характеристики	Значение
Диаметр внутренней поверхности сферы, м	2,0
Диаметр выходной апертуры, м	1,0
Источники	22 ВГЛ и 8 ксеноновых
Спектральный диапазон, нм	350 - 1050
Пространственная однородность, %	>99
Угловая однородность, %	>98

ПОГРЕШНОСТЬ КАЛИБРОВКИ (АТТЕСТАЦИИ) ИНТЕГРАЛЬНОЙ СФЕРЫ ПО АБСОЛЮТНОМУ ЗНАЧЕНИЮ СПЭЯ

Погрешность калибровки сферы по СПЭЯ (Вт/м^2 ср мкм) не должна быть более 5% (желательно 1-3%) во всём спектральном диапазоне, иначе вклад в общую погрешность ОЭА ДЗЗ будет слишком велик. Вот некоторые примеры интегральных сфер, когда получилось достичь такой погрешности:

Организация (страна)	Диаметр сферы	Выходной зрачок	Погрешность в УФ (300 нм)	Погрешность в ВД (550 нм)	Погрешность в БИК (2500 нм)
NIST NPR (США)	30 см	10 см	2%	1%	5%
DLR CHB (Германия)	165 см	40 × 55 см	2,5%	1 - 1,5%	3%
ВНИИОФИ (Россия)	200 см	60 см	3%	1 - 1,5%	3%

В ИК-диапазоне погрешность всегда выше по следующим физическим причинам:

- Тепловой фон самой сферы
- Нелинейность ИК-детекторов
- Потеря Ламбертовских свойств покрытий
- Флуоресценция покрытий

Расчет относительной ошибки калибровки [6]:

$$\varepsilon = \frac{|L_{\text{изм}} - L_{\text{СПЭЯ}}|}{L_{\text{СПЭЯ}}} \cdot 100\%, (11)$$

где ε – относительная ошибка калибровки,
$L_{\text{изм}}$ - измеренная СПЭЯ,
$L_{\text{СПЭЯ}}$ - СПЭЯ эталонной сферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Technical Guide. Integrating Sphere Theory and Applications. // Labsphere [сайт]. – 2026. – URL: https://www.labsphere.com/wp-content/uploads/2021/09/
2. Labsphere. Integrating Sphere Uniform Source Applications : Techguide. — North Sutton, NH : Labsphere, Inc., [б. г.]. — 16 с.
3. ГОСТ Р 54350-2015
4. Д.А. Отряскин, В.Р. Гаврилов, Б.Б. Хлевной, Е.А. Ивашин, Пузанов А.В. Широкоапертурный диффузный источник излучения в виде интегрирующей сферы со спектром излучения близким к солнечному // Доклад на VI всероссийской конференции «Метрологическое обеспечение фотоники 2026», 16-18 июня 2026 г., Москва.
5. Лузганова М.Ю. Радиометрический комплекс для наземной калибровки оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли // Доклад на VI всероссийской конференции «Метрологическое обеспечение фотоники 2026», 16-18 июня 2026 г., Москва.
6. Sapritsky V. I. Current activity of Russia in measurement assurance of Earth optical observations / V. I. Sapritsky, V. N. Krutikov, V. S. Ivanov, A. S. Panfilov [et al.] // Metrologia. – 2012. – Vol. 49, № 2. – P. S9–S16. – DOI 10.1088/0026-1394/49/2/S9.

РКС
РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Докладчик:
Корнеев Михаил
Владимирович

